



УДК 621.313.33

## ОГРАНИЧЕНИЕ ТОКА СТАТОРА В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМ АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПРИ СКАЛЯРНОМ УПРАВЛЕНИИ

## STATOR CURRENT LIMITING IN VARIABLE-FREQUENCY ELECTRICAL DRIVE WITH SCALAR CONTROL SYSTEM

**Щербakov Дмитрий Андреевич**, студент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: scherbakoff.dima@yandex.ru, Тел.: +7(922)616-96-99

**Поляков Владимир Николаевич**, д-р. техн. наук, профессор каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.n.polyakov@urfu.ru. Тел.: (343)3754646

**Dmitriy A. Shcherbakov**, Student, Department «Electric Drives and Automation of Industrial Enterprises», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: scherbakoff.dima@yandex.ru. Ph.: +7(922)616-96-99

**Vladimir N. Polyakov**, Doctor Sc., Prof., Department «Electric Drives and Automation of Industrial Enterprises», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.n.polyakov@urfu.ru. Ph.: (343)3754646

**Аннотация:** Рассматривается проблема ограничения тока статора асинхронного электропривода при перегрузке. Дается постановка задачи исследования. Приводятся математическая модель простейшей скалярной системы с отсечкой по току и результаты математического моделирования процессов электропривода в режимах ограничения тока статора.

**Abstract:** The problem of stator current limiting of asynchronous electrical drive under overload is reviewed. Task of research is stated. Mathematical model of simplest scalar control system with current limiter and results of mathematical modeling of electrical drives in stator limiting modes are included.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод; система скалярного управления; отсечка по току; переходный процесс.

**Key words:** asynchronous electrical drive; scalar control system; stator current limiting; transient response.

### ВВЕДЕНИЕ

Системы скалярного управления частотно-регулируемых асинхронных электроприводов находят широкое применение для механизмов, не требующих высокого качества регулирования скорости. При низких требованиях к диапазону регулирования, точности стабилизации скорости и динамике используются разомкнутые по скорости системы скалярного управления с ограничением тока статора при перегрузках. В таких электроприводах ограничение тока статора осуществляется с помощью токовой отсечки. Системы скалярного управления с токовой отсечкой реализованы в преобразователях частоты иностранных фирм: Siemens и др. Вместе с тем сведения об особенностях поведения систем

скалярного управления в режиме токовой отсечки практически отсутствуют.

Задачи работы:

- разработка математической модели системы скалярного управления с токовой отсечкой;
- моделирование процессов системы скалярного управления в режиме токовой отсечки;
- анализ особенностей переходных процессов в режиме токовой отсечки.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 приведена структура простейшей системы скалярного управления асинхронного электропривода с токовой отсечкой, представляющей собой упрощенный вариант системы управления, описанной в [1].

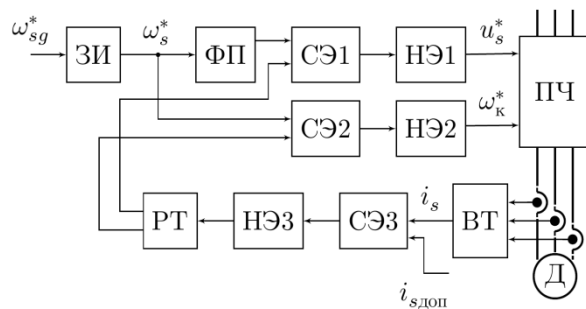


Рис. 1. Структура асинхронного электропривода:  
ПЧ – преобразователь частоты; Д – асинхронный двигатель;  
ВТ – вычислитель тока статора; НЭ1,...,3 – нелинейные  
элементы; СЭ1,...,3 – суммирующие элементы; ФП –  
функциональный преобразователь; ЗИ – задатчик  
интенсивности

Для защиты преобразователя частоты и двигателя от перегрузки по току статора в электроприводе предусмотрен узел токовой отсечки с элементами ВТ, НЭ3, РТ и СЭ1,...,3. Выходной сигнал регулятора РТ узла токовой отсечки при превышении тока статора допустимого значения действует как на уменьшение величины напряжения, так и на снижение частоты напряжения статора. Принцип работы отсечки по току и качественный анализ механических характеристик электропривода в режиме токовой отсечки рассмотрены в [1].

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

**Модель силовой части.** При допущении линейности характеристики преобразователя частоты математическая модель АД описывается во вращающейся с произвольной угловой скоростью  $\omega_k$  прямоугольной системе координат следующими векторно-матричными уравнениями [2]:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_s &= \mathbf{K}_{пч} \mathbf{U}_s^* ; \\ \mathbf{U}_s &= T_6 p \mathbf{\Psi}_s + \omega_k \mathbf{B} \mathbf{\Psi}_s + \mathbf{R}_s \mathbf{I}_s ; \\ \mathbf{0} &= T_6 p \mathbf{\Psi}_r + \beta_k \mathbf{B} \mathbf{\Psi}_r + \mathbf{R}_r \mathbf{I}_r ; \\ \mathbf{\Psi}_s &= \mathbf{\Psi}_m + \mathbf{L}_{s\sigma} \mathbf{I}_s ; \\ \mathbf{\Psi}_r &= \mathbf{\Psi}_m + \mathbf{L}_{r\sigma} \mathbf{I}_r ; \\ \mathbf{\Psi}_m &= \mathbf{F}_m \mathbf{I}_m ; \\ \mathbf{I}_m &= \mathbf{I}_s + \mathbf{I}_r ; \\ m &= \mathbf{B} \mathbf{\Psi}_m \bullet \mathbf{I}_s ; \\ m - m_c &= T_j p \omega , \end{aligned}$$

где  $\mathbf{U}_s^* = [u_{sx}^* \ u_{sy}^*]^T$  – вектор сигналов управления преобразователем частоты;  
 $\mathbf{U}_s = [u_{sx} \ u_{sy}]^T$  – вектор напряжений статора;  
 $\mathbf{I}_j$  и  $\mathbf{\Psi}_j$  – векторы токов и полных

потокосцеплений обмоток статора ( $j=s$ ) и ротора ( $j=r$ ),  $\mathbf{I}_j = [i_{jx} \ i_{jy}]^T$  и  $\mathbf{\Psi}_j = [\psi_{jx} \ \psi_{jy}]^T$ ;  $\mathbf{\Psi}_m$  и  $\mathbf{I}_m$  – векторы главных потокосцеплений и результирующих намагничивающих токов,  $\mathbf{\Psi}_m = [\psi_{mx} \ \psi_{my}]^T$ ,  $\mathbf{I}_m = [i_{mx} \ i_{my}]^T$ ;  $\omega_k$  и  $\omega$  – угловая скорость вращения системы координат и ротора;  $\beta_k$  – абсолютное скольжение системы координат;  
 $p = d/dt$  – оператор дифференцирования по времени;  $\bullet$  и  $T$  – символы скалярного произведения и транспонирования алгебраических векторов.

В уравнениях модели силовой части электропривода введены следующие матрицы:

$\mathbf{K}_{пч}$  – диагональная матрица коэффициентов усиления идеализированного преобразователя частоты,  $\mathbf{K}_{пч} = \text{diag}[1 \ 1]$ ;  $\mathbf{R}_j$  и  $\mathbf{L}_{j\sigma}$  – матрицы активных сопротивлений и индуктивностей рассеяния обмоток статора и ротора,  $\mathbf{R}_j = \text{diag}[r_j \ r_j]$  и  $\mathbf{L}_{j\sigma} = \text{diag}[l_{j\sigma} \ l_{j\sigma}]$ ,

где  $r_j$  и  $l_{j\sigma}$  – активные сопротивления и индуктивности рассеяния обмоток статора ( $j=s$ ) и ротора ( $j=r$ );  $\mathbf{B}$  – матричный коэффициент,

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad T_6 \text{ и } T_j - \text{временные константы};$$

$\mathbf{F}_m$  – нелинейный оператор, с помощью которого учитывается связь между главными потокосцеплениями и результирующими намагничивающими токами двигателя.

Уравнения модели силовой части записаны в относительных единицах.

**Модель системы управления.** Модель системы управления включает уравнения нелинейных элементов НЭ1 и НЭ2, выполняющих функцию ограничения сигналов управления

преобразователя частоты  $u_{sx}^*$  и угловой скорости

$\omega_k$  и элементов узла токовой отсечки.

Характеристики НЭ1 и НЭ2 описываются формулами:

$$u_{sx}^* = \begin{cases} \Delta u_{sx}^* & \text{при } 0 \leq \Delta u_{sx}^* \leq \Delta u_{sx \text{ доп}}^* ; \\ 0 & \text{при } \Delta u_{sx}^* < 0 ; \\ \Delta u_{sx \text{ доп}}^* & \text{при } \Delta u_{sx}^* > \Delta u_{sx \text{ доп}}^* ; \end{cases}$$

$$\omega_k = \begin{cases} \Delta \omega_s & \text{при } 0 \leq \Delta \omega_s \leq \Delta \omega_{s \text{ доп}} ; \\ 0 & \text{при } \Delta \omega_s < 0 ; \\ \Delta \omega_{s \text{ доп}} & \text{при } \Delta \omega_s > \Delta \omega_{s \text{ доп}} , \end{cases}$$

где  $\Delta u_{sx}^*$  и  $\Delta \omega_s$  – входные сигналы НЭ1 и НЭ2, поступающие с суммирующих элементов СЭ1 и СЭ2;  $\Delta u_{sx \text{ доп}}^*$  и  $\Delta \omega_{s \text{ доп}}$  – допустимые значения входных сигналов.

Сигнал  $u_{sy}^*$  в модели принимается равным нулю, что соответствует ориентации системы координат по вектору напряжений статора.

Элементы СЭ1 и СЭ2 осуществляют алгебраическое суммирование:

$$\Delta u_{sx}^* = f(\omega_s^*) - u_{xoc};$$

$$\Delta \omega_s = \omega_s^* - \omega_{koc},$$

где  $f(\omega_s^*)$  – характеристика ФП, определяющая закон частотного управления;  $\omega_s^*$  – выходной сигнал ЗИ;  $u_{xoc}$  и  $\omega_{koc}$  – сигналы обратных связей по каналам напряжения и частоты.

Сигналы обратных связей  $u_{xoc}$  и  $\omega_{koc}$  поступают с выхода фильтра регулятора РТ. Регулятор РТ с фильтром на выходе описывается следующими уравнениями:

$$u_{xoc} = k_{us} u_{\phi, \text{рт}};$$

$$\omega_{koc} = k_{\omega k} u_{\phi, \text{рт}};$$

$$(T_{\phi} p + 1) u_{\phi, \text{рт}} = u_{\text{рт}};$$

$$u_{\text{рт}} = u_{\text{рт.п}} + u_{\text{рт.и}};$$

$$u_{\text{рт.п}} = k_{\text{рт}} u_{\text{нэ3}};$$

$$u_{\text{рт.и}} = R(p) [k_{\text{рт}} u_{\text{нэ3}} - kg(u_{\text{нэ3}}) u_{\text{рт.и}}];$$

$$u_{\text{нэ3}} = f_{\text{нэ3}}(\Delta i_s);$$

$$\Delta i_s = i_s - i_{s \text{ доп}};$$

$$i_s = (i_{sx}^2 + i_{sy}^2)^{1/2},$$

где  $k_{us}$  и  $k_{\omega k}$  – коэффициенты усиления обратных связей;  $u_{\phi, \text{рт}}$  и  $u_{\text{рт}}$  – выходные сигналы фильтра и регулятора тока;  $T_{\phi}$  – постоянная фильтра;  $u_{\text{рт.п}}$  и  $u_{\text{рт.и}}$  – сигналы, пропорциональные рассогласованию и интегралу от рассогласования между допустимым (уставкой на ограничение) и фактическим токами статора;  $k_{\text{рт}}$  – коэффициент усиления пропорциональной части РТ,  $k_{\text{рт}} = r_{\gamma} T_{\gamma} / T_i$ , где  $r_{\gamma}$  и  $T_{\gamma}$  – эквивалентные активные сопротивление фазы двигателя и электромагнитная постоянная звена токов статора [3];  $R(p)$  – передаточная функция

интегральной части РТ,  $R(p) = 1/(T_{\text{рт}} p)$ , где

$$T_{\text{рт}} = r_{\gamma} T_i, T_i = 2T_{\phi}; \quad u_{\text{нэ3}} - \text{выходной сигнал}$$

НЭ3;  $k$  – коэффициент усиления обратной связи интегратора, обеспечивающей сброс сигнала РТ;

$g(u_{\text{нэ3}})$  – пороговая функция,

$$g(u_{\text{нэ3}}) = \begin{cases} 1 & \text{при } u_{\text{нэ3}} = 0; \\ 0 & \text{при } u_{\text{нэ3}} \neq 0; \end{cases}$$

$f_{\text{нэ3}}(\Delta i_s)$  – характеристика НЭ3,

$$f_{\text{нэ3}}(\Delta i_s) = \begin{cases} 0 & \text{при } \Delta i_s \geq 0; \\ \Delta i_s & \text{при } \Delta i_s < 0. \end{cases}$$

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

*Условия моделирования.* При моделировании переходных процессов использовался асинхронный двигатель серии 4А132М2У3 мощностью 11 кВт. В системе относительных единиц параметры двигателя имеют следующие значения:  $r_s = 0,0045$ ;  $r_r = 0,0283$ ;  $l_{s\sigma} = 0,07$ ;  $l_{r\sigma} = 0,137$ ;  $r_{\gamma} = 0,073$ ;  $T_{\sigma} = 0,0032$  с;  $T_{\gamma} = 0,0085$  с.;  $T_j = 0,3$  с.;  $T_{\phi} = 0,0005$  с.

Характеристика намагничивания  $i_m = f(\psi_m)$  по главному магнитному пути принята линейной,  $i_m = l_m^{-1} \psi_m$ , где  $l_m = 4,75$ .

*Результаты моделирования.* Программа моделирования заключалась в исследовании статических механических характеристик и динамики системы скалярного управления асинхронного электропривода в режиме токовой отсечки.

На рис. 2 приведены механические характеристики электропривода при различных значениях коэффициентов усиления  $k_{us}$  и  $k_{\omega k}$  в каналах обратных связей. Расчет механических характеристик выполнен при фиксированном задании сигнала на входе ЗИ, соответствующем номинальной частоте напряжения статора. Видно, что в зависимости от значений этих коэффициентов характер механических характеристик в режиме токовой отсечки может сильно изменяться. Наиболее благоприятными с точки зрения поведения механических характеристик для исследуемого двигателя в режиме токовой отсечки являются значения  $k_{us} =$

$$k_{\omega k} = 1.$$

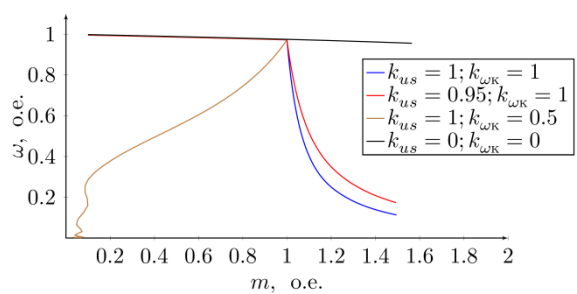


Рис. 2. Механические характеристики электропривода в режиме токовой отсечки

На рис. 3 представлены переходные процессы асинхронного электропривода с системой скалярного управления при различных настройках коэффициентов обратных связей по каналам напряжения и частоты.

Графики иллюстрируют пуск с реактивным моментом, работу привода на установившейся скорости и ступенчатый наброс нагрузки, при котором обеспечивается ограничение тока статора на уровне номинального значения.

В этой системе пуск протекает при наличии колебаний электромагнитного момента и тока статора, обусловленных электромагнитными процессами, протекающих в двигателе, так в приведенной структуре системы управления отсутствуют демпфирующие связи. Сигнал задания на частоту напряжения статора формируется ЗИ по линейному закону. Пуск осуществляется за 2 секунды.

После выхода на установившуюся скорость в момент времени, равный 2,5 секунды, осуществляется наброс реактивного момента, величина которого соответствует значению номинального момента двигателя. Видно, что в режиме токовой отсечки ток статора поддерживается на постоянном уровне. В этом численном эксперименте уставка на ограничение тока статора равняется номинальному значению тока двигателя. При этом напряжение статора и скорость вала двигателя снижаются. После достижения скорости определенного значения ток статора падает, принимая допустимое значение.

С помощью коэффициентов обратных связей  $k_{us}$  и  $k_{\omega_k}$  можно влиять на темп изменения скорости и напряжения, значения тока и электромагнитного момента. Как видно, при уменьшении  $k_{\omega_k}$  (рис. 3, б) темп изменения скорости увеличивается, а установившиеся значения тока и момента двигателя уменьшаются.

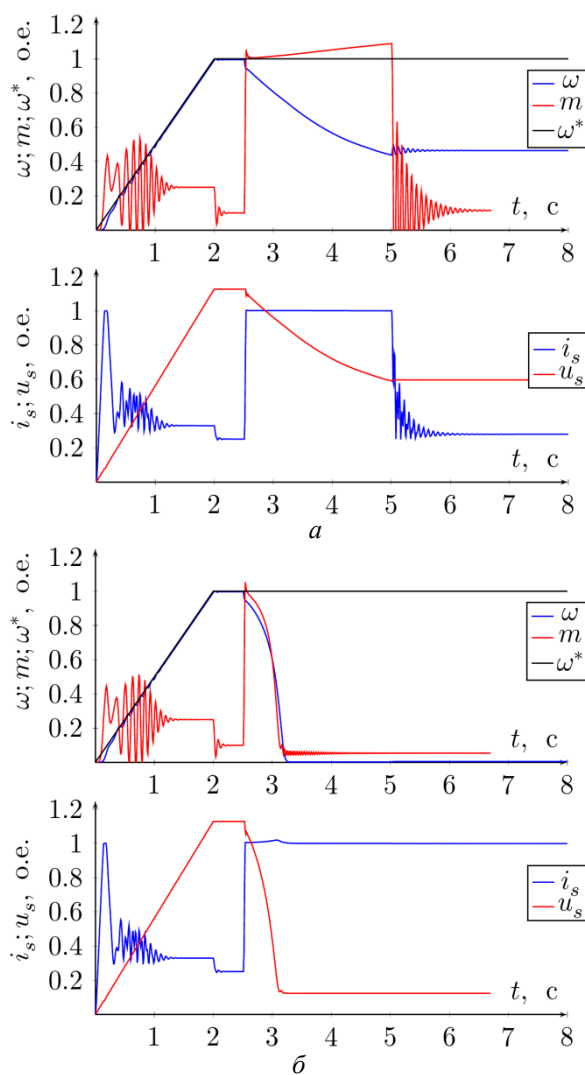


Рис. 3. Переходные процессы асинхронного электропривода:

а – при  $k_{us} = k_{\omega_k} = 1$ ; б – при  $k_{us} = 1$  и  $k_{\omega_k} = 0,5$

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / Под ред. В.М. Терехова. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 304 с.
2. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока / Под ред. Р.Т. Шрейнера. Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально - педагогический университет», 2012. 220 с.
3. Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. Кишинев: Штиинца, 1982. 224 с.